

四脚歩行ロボット 搭載用両眼視覚システムの開発

Design and Development of Binocular Vision System for a Quadrupedal Walking Robot

三ツ谷 祐輔*, 近野 敦*, 阿部 幸勇*, 内山 勝*

Yusuke Mitsuya*, Atsushi Konno*, Koyu Abe*, Masaru Uchiyama*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : 四脚歩行ロボット (quadrupedal walking robot), 能動ステレオ視 (active stereo vision), 輻輳制御 (vergence control), ゼロ視差フィルタ (zero disparity filter), 物体追跡 (track moving object)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻内山研究室
三ツ谷 祐輔, Tel.: (022)217-6973, Fax: (022)217-6971, E-mail: mitsuya@space.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

様々な物体が散在し, 複数移動体を含むような動的複雑環境において, ロボットが周囲の環境と調和して活動するためには, 大局的な情報を得るために周囲を見回す, 局所的な情報を得るために対象物に近づくといったように, そのおかれた環境を知る必要がある. また, 環境の変化に応じた行動をとるためには外界情報を高速で処理できる能力が不可欠である. 人間においては, 外界情報のほとんどが視覚を通して得られている. ロボットにおいても, 視覚による移動物体の発見及び追跡は, 物体の位置や動き, 形状などの種々の情報を収集するために重要な役割を果たす.

観測対象の動く範囲, あるいは観測すべき範囲が限られる場合は, カメラを固定し, その観測画像内で追跡する手法が有効である. しかし, 視覚センサから得られるすべてに情報を均等に処理す

る従来の受動視覚では, 計算量が膨大になり, 実時間でロバストな情報処理を実現することが難しい. 特に, 視覚情報に基づいて行動するロボットに有用な情報を提供する場合には, 情報の遅延は致命的なものとなる.

これらの問題を解決するため, 近年のロボットの視覚研究において, 視覚センサを能動的に運動させ, 物体や環境の一部への注視を繰り返すことで, 実時間で頑強な視覚機能を実現しようとする能動視覚の研究が数多く見受けられるようになってきた. 能動視覚は, 常に対象物体をその視野の中心に捉えるようにカメラの視線を制御することにより, 次のような多くの利点をもたらす.

- 広範な視野の獲得により, 予測不可能な動きに対しても対処できる.
- 視野中心を注視領域として画像処理を集中できる.
- 画像の周辺部におけるレンズ歪みの影響を

回避できる。

- 両眼システムの場合，観測対象が注視点付近に保持されるため，両眼視差特徴が常にゼロ近傍の値を持つ。

このように，能動視覚によって環境認識に都合の良い性質を得ることができ，さらに，両眼システムでは対象物体の3次元位置の測定などのステレオ視覚システムの利点も得ることが可能となる。

また，現在，脳型視覚情報処理システムを実現するために高次視覚野のモデル検討を行っており，人間の網膜のような構造を有する3次元積層中心窩視覚センサを開発，アクチュエータを用いて2個の視覚センサを動かして形状視，立体視を行う研究を進めている。網膜は中心視野および周辺視野でその解像度が大きく異なっているため，周辺視において環境の大まかな様子をさぐり，中心視で対象を注視するという人間に似た素早い注視制御を実現するには有効であると考えられる。

本論文では人間の視覚系にヒントを得ながら，開発した能動両眼ロボットヘッドにより，実世界で環境と相互作用しながら行動する四脚歩行ロボットのための実時間視覚システムを構築することを目的とする。また，動的複雑環境中で有効な視覚的追跡機能の一つであるゼロ視差フィルタ法と，これに基づく移動物体追跡の基礎実験について述べ，この追跡アルゴリズムの有効性を確認する。

2. ゼロ視差フィルタ法による追跡

本論文では物体追従処理を実現するための手法としてゼロ視差フィルタ法を用いた。

2.1 ゼロ視差フィルタ法

ゼロ視差フィルタ法の基本原理は，Fig. 1 に示すように，左右のカメラから得られた画像から，両眼視差がゼロであるような画像特徴のみを出力し，それ以外を除去するものである。この結果得

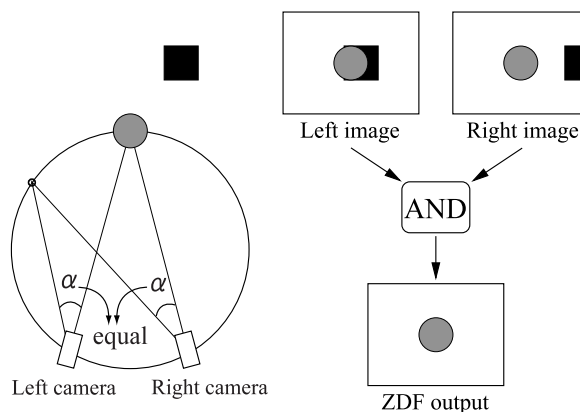


Fig. 1 Zero disparity filter.

られる画像上の特徴点は，ホロプタ (Horopter) と呼ばれる左右カメラの光学中心と注視点の3点を通る円周上の物体に対応し，円周上にはない物体からの特徴は除去される。すなわち，ゼロ視差フィルタが検出する視差ゼロの特徴は，ホロプタ上のみ存在する。

ゼロ視差フィルタ法によってホロプタ上にある物体のみを注視すれば，対象がホロプタ上を移動する限り追跡可能であるが，対象のホロプタに直交する方向の運動成分に関する情報は得られないため，追跡制御には支障がある。このため対象の奥行き位置を求めるために，喜多¹⁾らは仮想ホロプタという概念を導入し，ゼロ視差フィルタ法の原理のみに基づく拡張ゼロ視差フィルタ法を開発した。これは，ごく基本的な画像演算だけで奥行き位置の同定までも同時に算出できるため，ロボットビジョンに適した手法である。

2.2 ゼロ視差フィルタ法の利点

ゼロ視差フィルタ法を用いる利点として，

- 奥行き選択性がある。
- 対象に対するモデルが不要で不特定の対象を追跡できる。
- 対象の回転に強く，対象物体の姿勢に影響されず追跡できる。
- 計算量が少ないため実時間性が強く望まれるロボットの視覚に適している。

- ノイズに強い。
- 個々のカメラのキャリブレーションが不要。

などが挙げられる。

2.3 複数特徴の利用

一般にゼロ視差フィルタを用いる際には、3次元空間においてホロプタ近傍には対象物体しか存在しないという前提があり、ホロプタ近傍に他の物体が存在する場合や、背景によっては追跡に失敗する可能性が非常に高いと考えられるが、複数の特徴抽出器をフィルタの入力画像に作用させることで、ロバスト性を向上させることが可能である。

現在、ゼロ視差フィルタ法を用いた移動物体の追跡研究としては、エッジ画像を利用する方法が多く行われている。本論文では、エッジ画像を利用する方法は誤対応が多いために用いず、カラー情報を利用する方法、相関演算を利用する方法を利用する。

2.3.1 カラー情報に基づくゼロ視差フィルタ法

左右のカメラから得られた画像から輝度、色彩、色相が一定の範囲内にある領域を抽出し、それを用いて重心追従制御を行う。この方法ではゼロ視差フィルタへの入力面積を持った領域であるために、現在注視しているホロプタが真のホロプタとある程度大きくずれた場合でも最終的には真のホロプタに収束できる。対象と似た輝度、色彩、色相の物体が背景に存在しなければこの方法は最もロバスト性が高い。

処理ウィンドウサイズは 400×400 [pixel] と設定した。色抽出の処理時間は約 20 [ms] であり、NTSC ビデオフレーム (約 33 [ms]) に収まっている。

2.3.2 相関演算に基づくゼロ視差フィルタ法

まず、右眼画像中の対象物体の特徴領域をテンプレート登録し、右眼画像を探索領域とすること

で特徴領域を探索し、その特徴領域が画像中心に来るように右カメラのパン角と左右カメラ共通のチルト角を制御する。つぎに、テンプレートにマッチした右眼画像中の領域をテンプレート画像とし、左眼画像を探索領域としたステレオマッチングを行い、左カメラのパン角を輻輳制御する。

テンプレートサイズは 30×30 [pixel]、トラッキングにおける処理ウィンドウサイズは 150×150 [pixel]、ステレオマッチングにおける処理ウィンドウサイズは 40×150 [pixel] と設定した。トラッキングとステレオマッチングは、日立高速画像処理ボード IP5000 の正規化相関演算機能を用いており、処理時間は約 10 [ms] である。こちらも NTSC ビデオフレームに収まっている。

3. 能動両眼視覚システム

両眼視覚システムにおいて、対象を常に注視点近傍で捉えるよう左右カメラの姿勢を追従制御することを考える。これを実現するためには、カメラ姿勢を高速に精度良く駆動するための機構と、それを制御するシステムが必要であり、多くの能動視覚システムが人間の眼球系を模範として構築されている。

本論文においてベースシステムとしたのも、人間の眼球系を単純化した機構である。左右両眼に相当する 2 個の CCD カメラを各々独立に水平回転 (輻輳軸)、共通に上下回転 (チルト軸) するように DC モータ駆動している。

本システムは、汎用の画像処理装置である日立高速画像処理ボード IP5000、フィールド多重化装置、および四脚歩行ロボット用に開発された両眼ロボットヘッドで構成される。Fig. 2 に両眼ロボットヘッドの外観を、Table. 1 に仕様を示す。

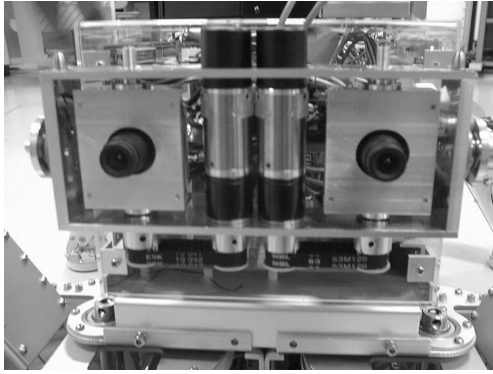


Fig. 2 Overview of binocular robot head.

Table 1 Specification of binocular robot head.

width	[mm]	208	range	[°]	60
height	[mm]	102.4	resolution	[°]	0.0125
depth	[mm]	79	max.speed	[°/s]	330
weight	[g]	630			
baseline	[mm]	100			

3.1 システム構成

構築した能動ステレオ視覚システムの構成を Fig. 3 に示す。

対象物体の画像を得るためには、外部同期が可能である NTSC のカメラ (CIS (株) 製 DCC-2055N × 2) を用いる。2 台のカメラからのビデオ出力は、フィールド多重化装置²⁾により、一つのビデオ信号に多重化された後、画像処理ボード (日立 IP5000) に入力される。IP5000 で画像処理された結果によりモータを駆動し、カメラ姿勢を変化させる。また、そのときにカメラから得られる画像は TV モニタに写し出され、対象物体を追従しているかどうかを知ることができる。

3.2 IP5000 画像処理ボード

IP5000 は、PCI バス・ハーフサイズの画像処理ボードで、NTSC カメラとテレビモニタにつないで用いられる。このボードは 40 面という多くのフレームメモリ (512 × 512 画素) を持っている。ま

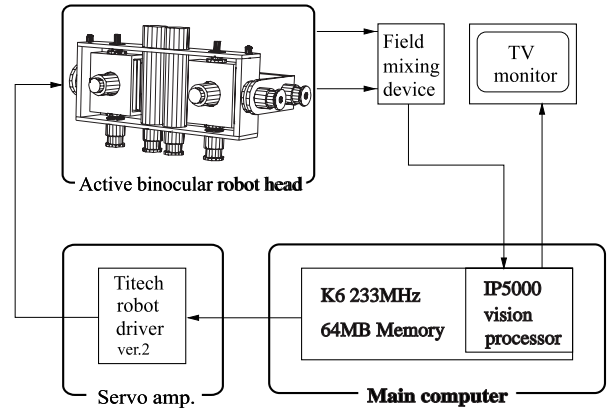


Fig. 3 Overview of active stereo vision system.

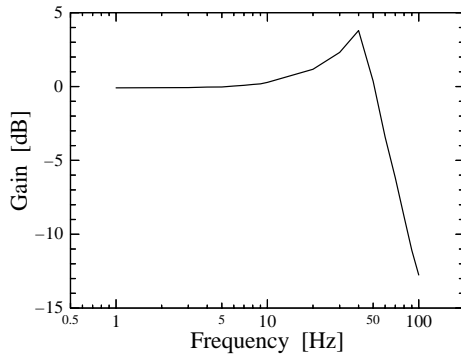
た、ボードに搭載されている画像処理 LSI はピクセルレート 73.5 [MHz] で動作し、二値化、ラベリング、ヒストグラム、色抽出、正規化相関など、多くの機能をハードウェアにより実行することができる。

本システムでは、このうちの色抽出機能、正規化相関機能を用いて、対象物体の特徴抽出、トラッキングを高速に行っている。

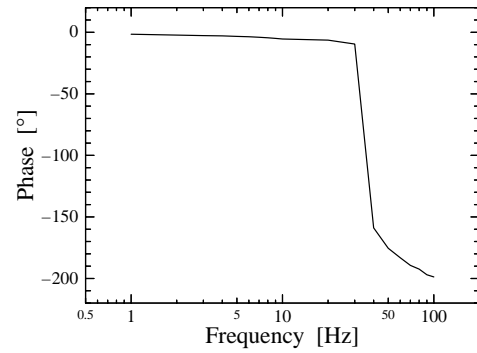
3.3 フィールド多重化装置

フィールド多重化とは、アナログレベルで二つのビデオ信号を多重化し、一つのビデオ信号にする技術である。このデバイスには、外部同期のなかった 2 台のカメラからのビデオ信号が入力され、その二つの信号はアナログスイッチ IC を用いてフィールド毎に多重化される。

この装置を用いて、左右カメラの NTSC インタレース形式の画像信号を even フィールド、odd フィールドに振り分けて混合し、一つの画像信号とする。これにより、正規化相関演算を 1 枚の画像内でステレオ処理することが可能となる。つまり、ステレオマッチングのための無駄な画像の転送を行う必要がない分、2 台の画像処理装置を用いたステレオシステムよりも高い処理性能を出すことが可能となる。



(a) Bode diagram(gain).



(b) Bode diagram(phase).

Fig. 4 Experimental results of frequency response.

4. 周波数応答実験

開発したロボットヘッドを用いて周波数応答実験を行った．本実験では，DC モータ駆動回路として Titech Robot Driver ver. 2 を速度制御モードで使用した．

振幅 ± 1 [°] の正弦波の位置目標を与え，それに追従させる実験を行った．制御則は，

$$u = K_p(\theta_d - \theta) \quad (1)$$

として， $K_p = 4583.6$ [s^{-1}] とした．ここで，

$$\begin{aligned} u &: \text{制御入力 [rad/s]} \\ \theta_d &: \text{目標角度 [rad]} \\ \theta &: \text{現在角度 [rad]} \end{aligned}$$

である．目標軌道は

$$\theta_d = \frac{\pi}{180} \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

で，サンプリングタイム 1 [ms] 毎に与えた．与える周波数 f を 1 [Hz] から 10 [Hz] までは 1 [Hz] 刻みに，それ以降は 10 [Hz] 刻みに変化させて 100 [Hz] まで実験を行った．

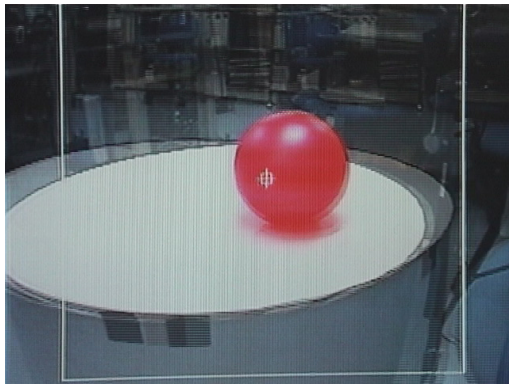
周波数応答実験の結果を Fig. 4 に示す．このボード線図を見ると，30 [Hz] の正弦波に十分追従していることがわかる．これにより，NTSCビデオフレームレート 30 [Hz] にも十分対応することができることが示された．Fig. 4 (a) で 40 [Hz] 前後にゲインのピークがあるのは，タイミングベルトとの共振周波数となっているためである．

5. 移動物体の追跡実験

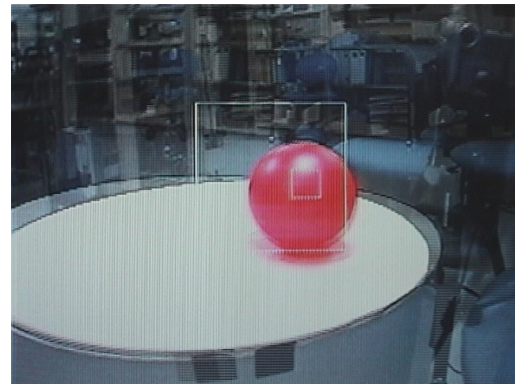
ゼロ視差フィルタ法での移動物体の追跡の有効性を確認するために，回転台を用いて移動物体の追跡実験を行った．

回転台を置く位置はカメラの基線の垂直二等分線上の距離 400 [mm] 付近の点とし，回転台の回転速度は任意に変化させた．また，追跡すべき対象物体は，半径約 35 [mm] の赤いボールとして，回転台の半径約 80 [mm] の位置に設置した．

カラー情報を用いた実験，正規化相関を用いた実験ともに，対象物体が画像中心に来るようにモータを制御した．カラー情報を用いた追跡実験を行った時の左右パン角の動きを Fig. 6 (a) に，正規化相関を用いた追跡実験の結果を Fig. 6 (b) に，それぞれの実験での対象物体と画像中心間の誤差を Fig. 6 (c) に示す．また，追跡時における内部処理画像を Fig. 5 に示す．この結果から，カラー情報による実験と正規化相関による実験の双方において，回転するボールを両眼により追跡できていることが分かる．モータ駆動によるノイズ発生，画像へのノイズ混入が予想されたのだが，グラフを見てもそのような結果は見られず，比較的滑らかに変化している．背景が複雑であるにも関わらず，実際にボールの追跡は十分に成功しており，ゼロ視差フィルタ法の有効性が確認された．ただし，カラー



(a) Color extract.



(b) Correlation.

Fig. 5 Camera image while tracking an object.

情報を用いた追跡では照明の変化によりボールの色を正しく抽出できないことがあった。また、正規化相関を用いた追跡ではステレオマッチングにおいて誤対応により両眼での追跡ができなくなることが度々みられた。

理想的には画像中心に対象物体の重心が来るはずだが、Fig. 6 (c) では、 ± 50 [pixel] 程度の誤差が見られる。これは、NTSCのビデオフレームレートが約 33 [ms] と遅く、高速移動する物体に対しては最大1フレーム分の移動距離の誤差が出るためである。搭載予定の3次元積層中心窩視覚センサでは、より高速に画像をサンプリングするので、この問題は解決されると思われる。

ゼロ視差フィルタ法は両眼視差がゼロである対象を取り出すためのフィルタ処理であり、実際にはゼロ視差フィルタの原理を利用した様々な移動物体の追跡手法が考えられる。それらの手法には、追跡すべき対象や背景などに応じて適、不適がある。あらゆる状況で安定して追跡を行うためにはより多くの追跡手法をもとに、それらを状況に応じて選択する必要がある。

6. おわりに

本論文では、四脚歩行ロボットのための両眼視覚システムの開発について述べた。本システムで

はゼロ視差フィルタ法を用いて対象物体の追跡を行ったのだが、複数特徴の利用により背景が複雑な場合にも、ロバスト性を向上させることが可能であると思われる。

本論文で用いたカラー情報、正規化相関演算に基づく手法では対象物体の特徴を指定することでそれを追跡しているに過ぎず、任意の物体を発見、追跡することはできない。ゼロ視差フィルタによる追跡の精度を上げる一方で、オプティカルフローを用いて移動物体を発見するなどの機能を持たせることが課題である。さらに、前述の3次元積層中心窩視覚センサを用いて、人間に似た素早い注視制御の機能の実現も大きな課題である。

謝辞

本研究の一部は科学技術進行事業団戦略的基礎研究推進事業(CREST)の補助を受けた。

参考文献

- 1) 喜多 伸之, S. Rougeaux, 國吉 康夫, 坂根 茂幸: 仮想ホロボタを用いた実時間追跡, 日本ロボット学会誌, 13-5, 101/108 (1995)
- 2) Y. Matsumoto, T. Shibata, K. Sakai, M. Inaba, and H. Inoue: Real-time Color Stereo Vision System for a Mobile Robot based on Field Multiplexing, Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1934/1939 (1997)

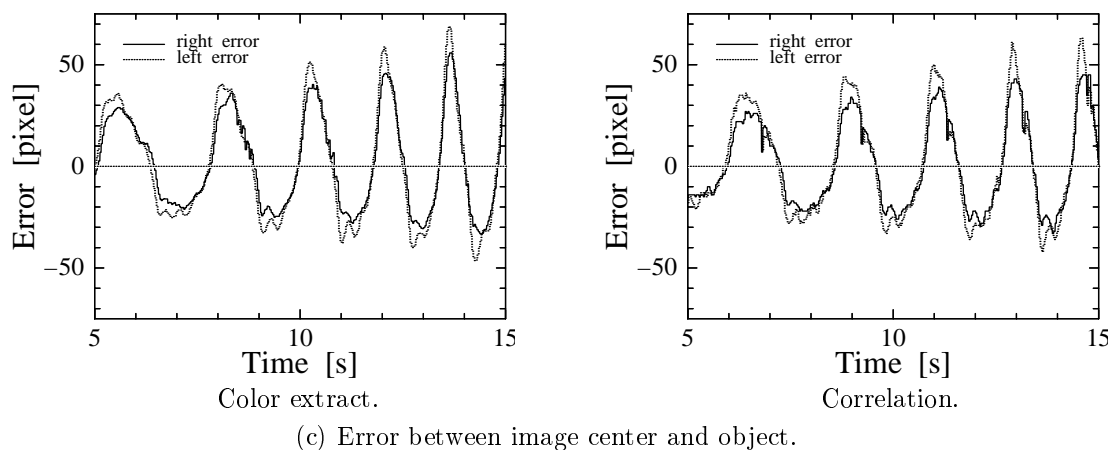
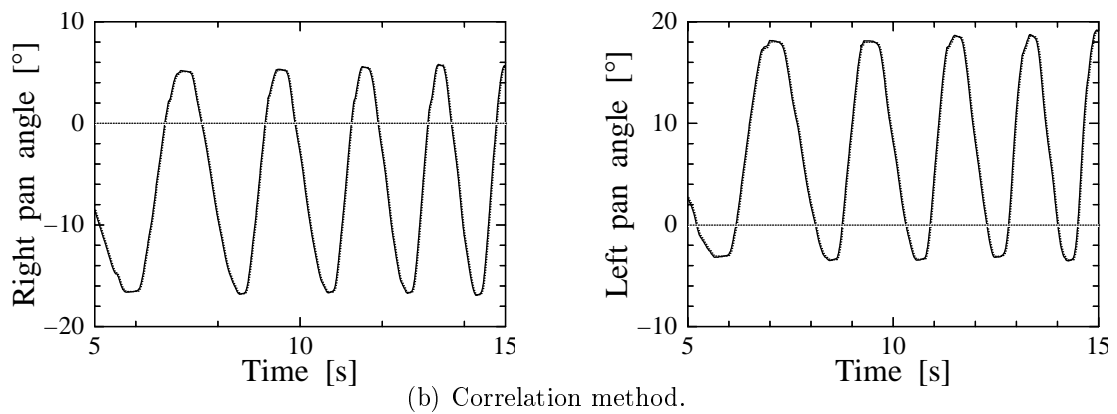
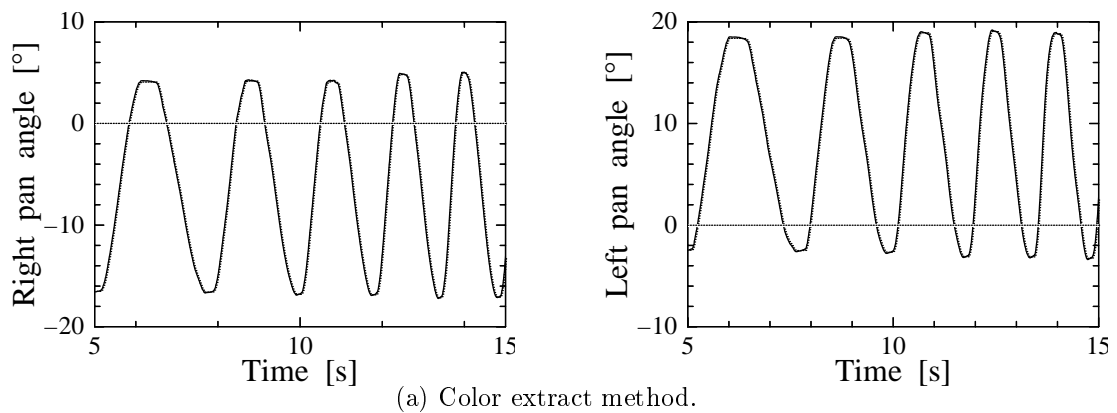


Fig. 6 Motor response while tracking an object.